

重庆几座新桥的设计理念

邓文中

林同棣国际公司

摘要：一座新桥的理念必需在方案设计时确定下来。本文主要简述重庆市的三座大桥，菜园坝，石板坡和乌江二桥的设计理念、如何克服每一座大桥存在的困难，而达到创新的目的。

关键词：桥梁设计，创新理念，系杆拱桥，斜拉桥，混合结构

1. 工程与创新

桥梁工程是一门艺术。艺术是灵活的，工程也是灵活的。满足既定功能要求的桥梁，可以在外观上、结构上和类型上有很多不同的选择。这种灵活性给工程师提供了创造和创新的空间。因为工程师所依据的，不仅仅是科学的真理；最重要的是贯彻和运用科学真理的智慧以及在工程实践中积累的经验。工程的准则，不是对不对，而是能不能。

创新是一个桥梁工程师的义务。创新不一定是发明。创新可以是贯穿在工程师日常工作中的一种理念。这个理念指导工程师通过新的构思，达到增加安全，降低成本，改善使用功能以及美化结构的效果。通过引入新的材料，新的结构形式和新的机械设备，工程师也能够简化施工过程，缩短施工时间。许多时候，桥梁设计和实施中的一些困难，也会激发工程师引进新的理念，来克服当前的困难。

所以，一座桥梁的设计可以是平庸的，可以是传统的，也可以是创新的。

二十一世纪的社会是一个高度竞争的社会。创新是生命力的体现。国家通过创新得以富强，企业通过创新增强竞争，行业通过创新求得发展，个人通过创新实现价值。

创新需要机会。上个世纪，战后的德国在大规模的重建过程中，运用现代的钢材复兴了斜拉桥的桥式；为节约钢材，发明了正交异性板桥面系；为改善施工环境，加快施工工期，完善了混凝土节段预制施工技术。今天的中国正处在前所未有的经济建设和基础设施建设高峰，要建造的大桥多不胜数。这给中国的工程师们提供了历史上从未出现过的好机会，给大家提供了一个充分发挥聪明才智的平台。作为这一历史时期的工程师，我们将为子孙后代留下怎样的作品，我们应该为桥梁建设史写下怎样的篇章？

我们是幸运的，也是任重道远的

2. 山城重庆

山城重庆坐落在中国大西南，滚滚嘉陵江汇入浩浩长江之处。重庆是一座很美丽的城市。有山有水！几条美丽的河流：长江，嘉陵江，乌江等，蜿蜒于山岭之间，形成了重庆特有的血脉，特有的曲线。

十多年来，重庆的市政建设迅速发展，所有的基础设施都在加快建设。长江、嘉陵江等将主城区分



割成几个部分。主城区的发展规划，需要在两江上建造大桥。我们可以说，重庆是国内大桥最多的一个城市。这些大桥，极大部份是过去这十多年建造的。我很幸运能作为技术总监，主持其中的菜园坝长江大桥、石板坡长江大桥复线改造工程和位于涪陵的乌江二桥三座大桥的设计。在这些设计中，我们尽量将创新理念贯穿在整个方案设计，细节设计和施工组织设计中，力求在其特定的条件下建造最合适的桥。

重庆市内还建造了许多大桥。这些桥都各有特色。下面的这三座，是我直接主持设计的。所以，我在这里和大家一起分享这三座大桥方案拟定的理念和过程。这三座桥，现在都正在施工中。

3. 菜园坝大桥

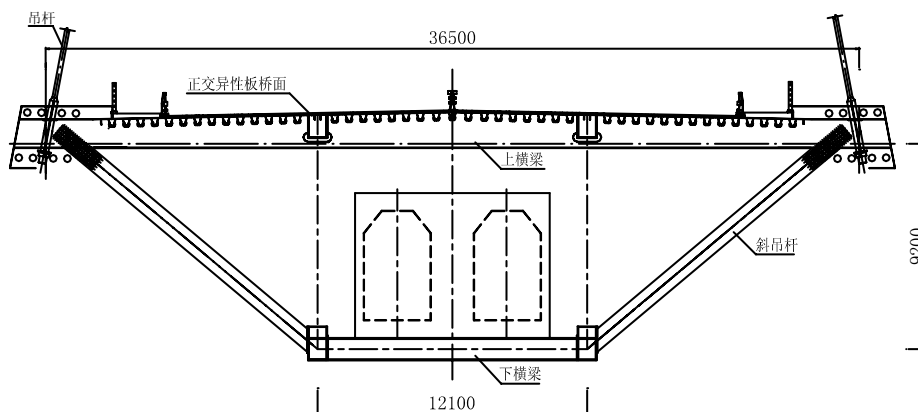
在开始设计菜园坝大桥的时候，大家有一个希望。希望这座新桥是一座拱桥。一座特别漂亮的拱桥。

我本人也很喜欢拱桥。尤其是因为这座桥是我在中国大陆上真正自己主持设计的第一座大桥。我特别地在重庆待了一段时间。把方案明确的确定下来。

菜园坝大桥位于渝中半岛南面，连接渝中的菜园坝和南岸。

菜园坝大桥的桥面是双层结构。上层有六个车道和双侧人行道。下层为双线轻轨车道。为了满足轻轨车道的净空要求，梁的高度为 11 米。由于长江上通航的要求，主桥的跨度被确定为 420 m。

首先，我认为主梁应该是桁架结构。让在轻轨列车中的乘客，也能欣赏到长江的景色。而如果用 11 米高的箱梁，看起来会很笨重。而且采用桁架结构也不需要考虑下层桥面的通风设计。上层六车道和下层两车道加双向轻轨的布置，使倒梯形的横截面成为最恰当的选择。在外面两侧加上斜杆，除把吊杆的力传递到中间的桁架外，还可以大大地减低了横梁的弯距。



梁的截面

拱桥可以分为有推力和无推力两种。真正的拱桥是有推力的，即拱脚的水平推力。在菜园坝大桥的桥位处，地质条件不错，可以承受较大的水平推力。但如果由地基直接承受水平推力，拱脚就要做得很

低，不能满足通航的要求。

无推力的拱桥是系杆拱桥。它可以是上承式，中承式和下承式。在满足了通航要求的前提下，上承式的桥拱会太扁，不能满足结构受力的要求。下承式的拱桥，因为拱身全部在桥面的上面，看起来很粗重。不能满足美观的要求。所以选择中承式的拱桥。在这个地方，主跨的位置偏向南端。高低水位相差很大。为了避免拱肋受到船舶撞击的可能，我们还把拱脚位置向上稍作提高。下部结构采用预应力混凝土，以此获得较高的抗撞击能力。

拱肋是拱桥的主要受力的骨干。拱肋主要是受压的杆件，必需考虑其竖向和横向的稳定。

在竖向方面，由于下层轻轨在变形上有比较严格的要求，桥的结构必需有相当的刚度，以限制变形。幸而轻轨列车的长度比较短，影响比较局部。主梁是 11米高的桁架，刚度大。因此拱肋的刚度要求就可以减低。在拱桥的设计上，因为吊杆在不同荷载下的伸长很有限，在验算拱桥的垂直方向的稳定时，大致可以把拱肋的刚度和梁的刚度叠加起来。所以，如果梁的刚度大，拱的刚度就可以小。相反，如果拱的刚度大，梁的刚度就可以减少。

因为菜园坝大桥的梁的刚度很大，拱肋就可以做得很柔。因为拱肋主要是受压的杆件，应用箱型截面会比桁架细小。在美观上，如果主梁和拱都是桁架，看起来桥的外型就太沉重，不够轻盈，会把长江的风景和重庆的秀气扰乱。重庆是一座美丽的山城。她的美丽就在于她的秀气。所以，在钢箱拱和钢管拱之间，我们选择了比较纤秀的、4m高和 2m宽的钢箱拱。根据我当时很简单的计算，垂直方向的弹性稳定系数大约是 6.0。超过一般要求的 4.0。



钢管拱

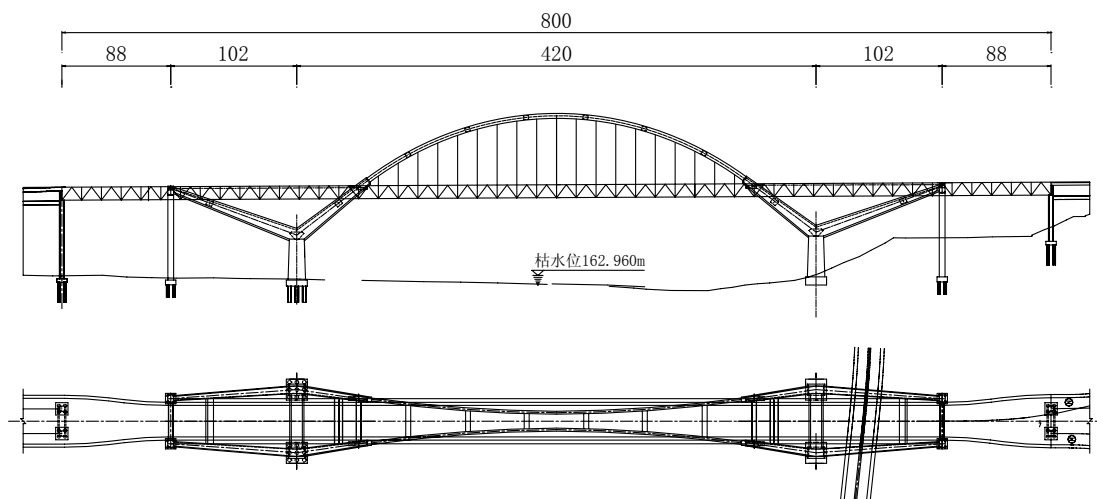
钢箱拱

在横向的稳定上，拱肋必需依靠横向的撑杆来保证其稳定。但是，为了美观，撑杆也必需做得纤秀，让路人看上去不至有凌乱和封闭之感。撑杆的作用是提供拱的横向稳定。若非地震和风振很强烈，一般桥面上面和下面的撑杆都是可以做得很简单。尤其对于提篮式系杆拱，斜拱肋之间的距离比较短，一对拱肋互相支撑。撑杆就可以做得更简单。当时根据 2.4 x 4 米箱形拱肋的局部稳定要求，暂时决定用六根横撑。而且为了整体的协调，这些横撑都是箱形的截面。

在结构体系上，菜园坝大桥可以说基本上是由三个单元部份构成的。在两端是一边一个预应力混凝土 Y 型钢构。中间则是一个钢箱拱。

在恒载作用下，通过调节两边钢构上的系杆和尾端的垂直预应力索，使钢构内的杆件的弯距减少。同时可以通过调节中间拱的系杆索力，达到只将垂直力传递到两边的 Y 型钢构上的效果。所以，在恒载的作用下，我们可以把这三个单元单独考虑。达到一个最理想的受力状态。

当然，事实上这三部份是不能分开的。因为在活载作用下，我们无法调整中间系杆的内力。系杆的内力只能根据结构各杆件的刚度分配。不过，在这样大的桥上，活载毕竟只是总载重的一小部份。比恒载要小很多。



几乎所有中承式系杆拱桥的边跨都设有立杆以支承梁的重量。这些立杆，由于是压杆，本身也有稳定的要求。截面不能太小。所以，很不好看。尤其是提篮式的系杆拱。因为边跨的拱肋是倾斜的。使每根立杆的角度都不相同。看起来会很凌乱。菜园坝大桥的主梁高度要求是 11 米，而边跨的跨径只有 102 米。主梁可以轻松的跨越整个 102 米的边跨。不须立杆的支撑。把边跨的立杆完全除去后，边跨变得十分开阔，全桥看来更特别轻巧。

除去立杆后，边跨的拱肋不再承受垂直的荷载，可改为直线。拱桥的下半部结构，是 Y 形的混凝土结构。我们把 Y 形结构的三个杆件的尺寸特别加粗，使它看起来更结实，更稳重。



系杆的设计必需特别留意。在 1980 年代，美国曾一度禁止建造系杆拱桥。其主因是认为系杆拱全依赖系杆的拉力。如果系杆有问题，系杆拱的安全就不能够保障。所以，我把系杆索与主梁分开、系杆索由多组拉索组成。拉索根据斜拉桥上斜拉索的工艺，采用高品质防锈措施，同时利用拉索的可更换性，达到高度安全的保障。

菜园坝大桥的系杆分为三组。中间拱的系杆和两边 Y 形结构上的系杆是分开的。每组系杆都可以依其自身情况加不同的拉力。

在方案设计的同时，也拟订了基本的施工计划。由于两岸的交通情况很不理想，预料所有较大的构件都必需从水路供应。但长江的水位变化很大。所以，施工基本要以天吊为主。同时，国内大部份拱桥都采用吊索安装。有丰富的经验作为后盾。

4. 石板坡大桥复线桥

原来的石板坡大桥，或称为长江一桥、建成于 1981 年。石板坡长江大桥旧桥为 86.5+4x138.0+156.0+174.0+104.5 米的 8 跨 T 型钢构桥，在每一跨均设有 35 米的简支挂梁。这桥原来的设计车流量是每天 20,000 辆。到如今，桥上的车流量已经超过每天 80,000 辆。大桥不胜负荷。所以决定增加一座复线桥，以疏导周边的交通。新桥桥址位于旧桥上游，两桥中心相距 25 米，上部结构净距 5 米。由于这新旧两座桥距离很近，为了美观上的考虑，新桥的总体型式必需和旧桥配合。这是一个难题。因为在美观上，无论新桥的桥型是斜拉桥，拱桥、桁架、或者是悬索桥，都很难和旧桥配合。

业主在详尽考虑后，要求新桥在技术上可行的条件下，应该是连续刚构。正桥总体桥跨必需与旧桥一致。但是，由于新桥和旧桥并排而立，两桥的桥墩的横向幅度就增大了很多。经航道专家们的论证，认为新桥的主跨必需提供 292 米的航道净宽。而要满足新桥的其他桥墩都必须与旧桥的桥墩位置吻合对应的要求，唯有把两个主跨之间的桥墩除掉。这样一来，新桥的主跨就变成 $156 + 174 = 330$ 米。

到目前为止，世界钢箱梁桥的跨度最大的是巴西的尼陀螺河大桥 (Rio Niteroi)，主跨 300 米。该桥建于 1974 年。直到目前、钢箱梁桥的跨度没有增加。究其原因，应该是在跨度达到一定的长度时，钢箱底板和腹板的厚度就会增加到难以加工，其经济效率也随之急遽下降。

世界混凝土箱梁桥的跨度最大的是挪威的史都马丝湾桥 (Stølemassundet)，主跨 301 米。挪威在过去十余年中还建了其它两座约 300 米的混凝土箱梁桥。这几座混凝土桥都是普通混凝土和轻质混凝土的混合结构。每座桥的中间一段都用了轻质混凝土，以改善大桥的受力状态。这三座桥的轻质混凝土的骨料，都是从美国进口的。但这三座桥的设计和建造，都很成功。

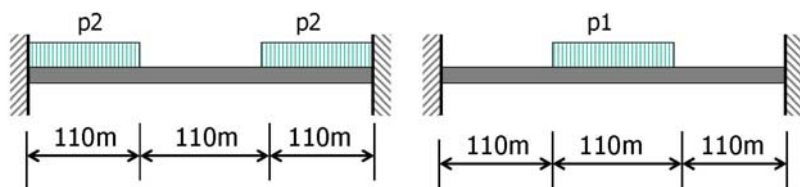
在这样跨度范围的箱梁结构，混凝土可以和钢箱梁竞争，主要难度是施工问题。在大跨度混凝土箱梁接近桥墩的地方，使用 200 公分厚的底板在施工上并没有大的困难。应用 60 MPa 的混凝土，其允许压应力是 32.5 MPa。如果改用 Q345 钢板，其允许应力是 207 MPa 的话，那 200 公分厚的混凝土板的承载力应该相当于 $200 \times 30 / 207 = 29$ 公分厚的钢板。这样厚的钢板很难生产。要加工也极困难。只能用一大堆比较薄的钢板用长列的螺栓连接起来。所以，当桥跨达到一定长度时，钢结构就会很不经济。

如果依照挪威的方式，使用普通混凝土和轻质混凝土的混合结构，在重庆地区还是不容易。我们在美国加利福尼亚洲设计宾尼西尼亚大桥 (Benicia) 的时候，曾在美国试验了约二十种美国市场上可以供应的轻质混凝土的骨料。发现只有三种骨料能满足我们技术上的要求。这也许是挪威要横过大西洋，到美国来买骨料的原因。如果我们要在石板坡大桥上应用轻质混凝土，除非也到美国买骨料，否则要在很短的设计时间内找到合适的国产的骨料，把握不大。而且，适用的轻质混凝土，价格也很高。

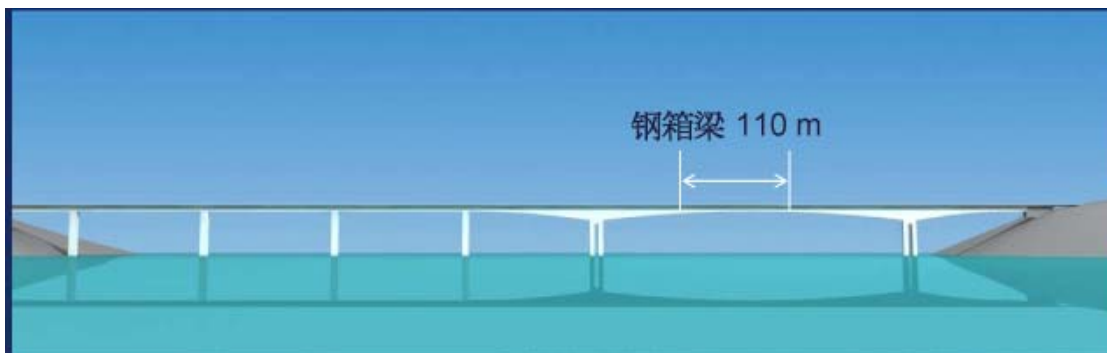
在这个实情下，我们决定不用轻质混凝土，而采用钢箱梁和普通混凝土的混合结构。

在这里，我们研究一下使用混合结构的好处。假如我们把 330 米的主跨分为三段，每段 110 米。为了简单，我们假设这是一根等截面、两端固结的梁。中间一段的重量为 p_1 kN/m，两边的重量是 p_2 kN/m。中间一段重量引起的在两端的力距是 $4369p_1$ kN-m。两边的重量，两个 110 米加起来所引起的在两端的力距是 $4706 p_2$ kN-m。加起来是 $4369 p_1 + 4706 p_2$ 。钢箱梁的重量大约是混凝土梁的 30%。所以，

如果我们把中间一段改为钢箱，两边则用混凝土，假设 $p_1=0.3p_2$ ，我们可以把由自重引起的、在梁的两端的力距减低大约三份之一。对一座大桥而言，这是很大的效益。因为这样一来，两端的力距也就和一根 269米的、全混凝土的箱梁相类似。中国现在最大的混凝土桥的跨度是虎门二航道的 270米。两座桥的类比跨度几乎相等。

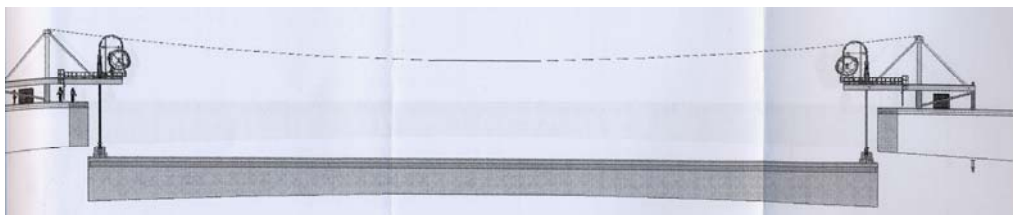


虽然上面的推算是一个简化的解释。但其基本原则是成立的。



石板坡大桥：桥跨的布置为 $87.75 + 4 \times 138 + 330 + 133.75$ 米

当然，依照这个计算方式，中间一段的长度是愈大愈有利。但是，除了力距之外，还要考虑价格和施工。在价格方面，钢箱梁要比混凝土箱梁贵。中间段的长度愈大，这差价就愈大。所以，我们只能有限地使用钢箱梁。



钢箱梁整体吊升方案

在施工方面，考虑希望能把中间一段整体吊装。那么在重量上，和运输上都有一定的限制。在总体的考虑之后，认为 103米的钢箱梁段是比较合理的选择。

这样一来，结构就如图所示。桥跨的布置为 $87.75 + 4 \times 138 + 330 + 133.75$ ，总长 1103.5米。钢箱梁和混凝土梁交接处，采用固结的方式。这样可以减少对徐变的敏感性。

同时，为了减少维修的工作，仅在桥台两端设伸缩缝。这样，在桥上行车也比较舒适。

钢箱梁整体在钢厂里加工。以船舶型式由拖船拖到现场吊装。钢箱梁整体重量大约为 1400 吨。用钢绞线和千斤顶吊升。这种吊装方式的例子很多。下图是香港深圳通道 1,700吨钢箱梁吊装的情形。石板坡的吊装方式基本上相同。



当然，有些工艺还是需要研究，例如水上运输时钢箱的稳定和疲劳问题以及钢混接头的细节等。但这些都不是很新的技术，

在确定了上面的基本原则后，其它的设计和施工都是很成熟的工艺，不再赘言。

石板坡大桥连续刚构所以能够达到 330米的跨度，是由于钢箱和混凝土箱混合应用。整体吊装的方案，是借用现有的成熟的

技术，同时能缩短工期。

5. 涪陵乌江二桥

为满足涪陵江东片区开发,完善城区路网的需要,涪陵区政府将乌江二桥确定在位于乌江一桥下游大约六百米,距两江汇合口约500米处,西接主城区的南门山,东接涪丰路。在三峡大坝建成蓄水后,这里的常年洪水水位的高程是 175米。为了避免深水基础,涪陵区政府要求尽快实施涪陵乌江二桥。

由于防洪的需要,在乌江的两岸都规划了堤坝工程,且靠主城侧的防洪大堤和码头等都已竣工。

考虑到桥位下游约一百米处有一个码头,且成库后预期在水位加高之后,很可能有较大吨位的游轮和货船在桥下通航。所以,航运单位通航论证报告要求乌江二桥的主跨跨径达到 340米。但是,桥位乌江两岸地形都比较陡峭,在西岸,由于桥头立交接线的限制,尤其是在北岸,边跨只能延伸 100米。对一个 340米的主跨来说,长度极不配合。南东岸的边跨,有 150米。对斜拉桥的结构协调性而言,这不是一个很合理的布跨。



涪陵乌江二桥

340米的跨度,除斜拉桥外,中承式或上承式的拱桥也可以选择。但是,由于两岸的建筑物的高程大都在桥面的下面,拱桥比较庞大的结构会对两岸居民的视线严重的干扰。在美观上不合理。而且,拱桥的价格也会比较高。所以,在衡量各种桥型的优劣后,认为应该是一座斜拉桥。

这工程对设计有三项要求:美观上必需轻盈,桥墩必需能抵受一定的撞击,投资必需最低。

在投资方面，混凝土的斜拉桥在涪陵这个地方应该是最经济的。

在美观和可能的船舶撞击方面，为了尽量减少视野的阻碍，我们建议使用单柱式桥塔。因为是单柱式，使用同量的材料，桥墩可以做得较为粗壮。达到可以承受较大横向撞击力的目的。

在决定选择斜拉桥型之后，我们必需解决北东岸边跨太短的问题。我们的答案是一座不对称的斜拉桥。我们根据两个边跨的长度的比例，制定两个桥塔突出桥面的高度。两岸边跨的总和， $100 + 150 = 250$ 米，是340米主跨的 74%。这还是在合理比例的范围内。自然，由于边跨总计起来还稍嫌太短，边跨上必需加上压重，来平衡中跨的重量。

为了便于西岸的接线, 与环境的协调美观, 决定采用单索面斜拉桥。单柱式桥塔，必然要放在桥面的中间。一般情况下，会把桥面的总宽度增加大约三到四米。使梁的价格依比例提高。但是，单柱式的桥塔，要比双柱式的桥塔便宜；同时，斜拉索的用量会适当减少。总体而言，在这项工程上，两种型式的结构，总价基本上是一样的。同时，单柱式的桥塔，适用于箱梁。双柱式的桥塔，适用于板梁。以当今国内营造业的现状，人工比较便宜。而且箱梁的悬臂施工技术比较成熟，箱梁的采用有一定的优势。



巴拿马运河第二大桥



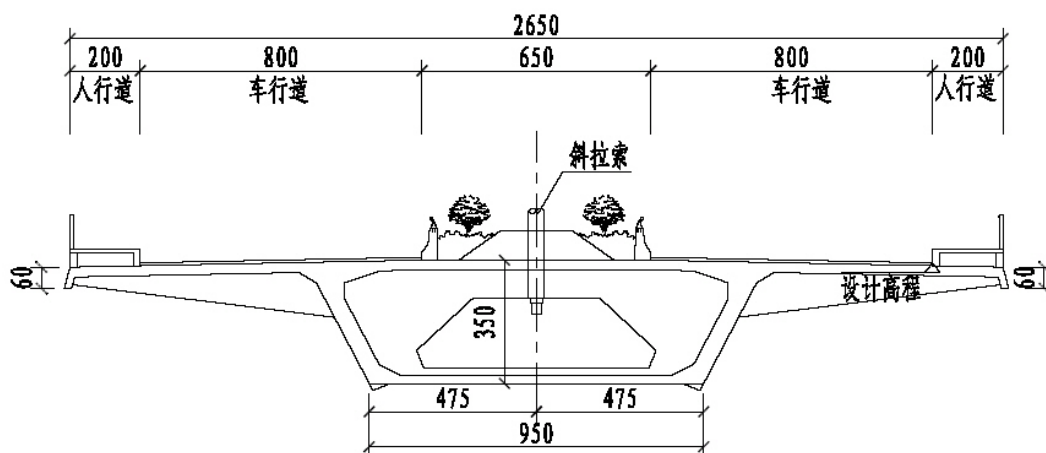
宾尼西亚大桥

桥面的宽度是 25.50米。包括可容纳桥塔的 5.50米中间分隔带，两个8米的双车道，和每侧两米的人行道。中间箱梁高 3.50米。全桥高度不变。单索面。拉索锚在中间分隔带中央。索距为 6.0米。

为了便于索力的传递，在箱梁内每根拉索的地方设一横隔板。用预应力把拉索的垂直分力传到腹板的底部。

箱梁为梯形截面，3.50 米高，箱的顶板宽 25.50 米，底板宽 9.29米。两边翼板各为 6.50米宽。在翼板下每隔 6.00米设横梁。这横梁大大减小了翼板的厚度。达到经济效益。我们在宽度大的箱型截面常常应用横梁结构。除乌江大桥外，最近完工的巴拿马运河第二大桥的近 35 米宽的截面，也是有效地应用横梁来减轻截面的总重量。

单柱式的桥塔，造型美观, 施工容易。同时，桥墩比较结实。可以提高抵抗船舶撞击的刚度。高低塔的应用，解决了一个边跨太短的难题。应用带横梁的箱形截面，可以减轻梁的自重，也更适用国内在悬臂施工上比较成熟的技术。



6. 成功的合作

菜园坝大桥是由林同棧国际公司和重庆交通科研究院研设计院联合体设计。石板坡大桥是由林同棧国际公司和林同棧国际重庆公司联合体设计。这两座桥的业主都是重庆市城市建设投资公司。鸣乌江大桥二桥是由林同棧国际重庆公司设计。业主是涪陵市政府区堤防公司。

作者是这三座大桥的技术总监。杨联章为总监督。参与这几座大桥设计的主要人员，林同棧国际有孙峻岭，何天弘，任国雷，马振栋，刘安双，代彤，尹德兰，杨春，郭兆祺，刘国祥等。交研院的韩道均和刘孝辉等也大力的参与了菜园坝大桥的设计。此外，大桥的设计始终得到业主们及各有关单位的通力合作。使这些比较创新的设计能顺利完成。

7. 结语

我在这里重述一遍，造桥是一门艺术。在同一个情况下，都可能有不同的选择。如何在方案的确定时，不因循守旧。把一些新的理念灌输进去。使得每一座桥梁，都得到合理的处理。那就是创新。

书本里常常有一些为帮助年轻工程师而定的规则。例如斜拉桥的合理跨度之类。有经验的工程师不应该为这些规则而烦恼。只要有理由，所有的书本上的规则都可以更改！